

## НТП И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 62-752.8(088.8)

**Клітний Володимир Вікторович**, канд. техн. наук, доц. кафедри «Деталі машин та прикладна механіка» Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна. Вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002, E-mail: [vlad\\_klitnoy@ukr.net](mailto:vlad_klitnoy@ukr.net) (orcid.org/0000-0003-0024-5959)

### АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНИХ ВІБРОЗАХИСНИХ СИСТЕМ З КЕРОВАНОЮ КВАЗІНУЛЬОВОЮ ЖОРСТКІСТЮ

*У статті розглянуто віброзахисні пружні системи з квазінульовою жорсткістю. Відмічена складність налаштування таких систем на розрахункове навантаження. Ця проблема може бути вирішена за рахунок керованості таких систем. Аналізуються існуючі віброзахисні системи з пасивно та активно керованою квазінульовою жорсткістю. Розглядається можливість використання в таких системах схем активного гасіння вібрацій, побудованих з застосуванням сучасних адаптивних матеріалів.*

**Ключові слова:** віброзахисна система, квазінульова жорсткість, активні системи, адаптивні матеріали

**Клитной Владимир Викторович**, канд. техн. наук, доц. кафедры «Детали машин и прикладная механика» Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина. Ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002, E-mail: [vlad\\_klitnoy@ukr.net](mailto:vlad_klitnoy@ukr.net) (orcid.org/0000-0003-0024-5959)

### АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ С УПРАВЛЯЕМОЙ КВАЗИНУЛЕВОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

*В статье рассмотрены виброзащитные упругие системы с квазинулевой жесткостью. Отмечена сложность настройки таких систем на расчетную нагрузку. Эта проблема может быть решена за счет управляемости таких систем. Анализируются существующие виброзащитные системы с пассивно и активно управляемой квазинулевой жесткостью. Рассматривается возможность использования в таких системах схем активного гашения вибраций, построенных с применением современных адаптивных материалов.*

**Ключевые слова:** виброзащитная система, квазинулевая жесткость, активные системы, адаптивные материалы

**Klitnoi Vladimir Viktorovich**, PhD. techn. sciences, associate professor at the department of machine parts and applied mechanics National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine. St. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine 61002, E-mail: [vlad\\_klitnoy@ukr.net](mailto:vlad_klitnoy@ukr.net) (orcid.org/0000-0003-0024-5959)

### ANALYSIS OF APPLICATION OF ACTIVE VIBRATION ISOLATION SYSTEMS WITH DRIVING QUASI-ZERO STIFFNESS

*The article gives an overview of the vibration isolation system with quasi-zero stiffness. Noting the complexity of adjustment such systems on the design load. This problem can be solved by the control of such systems. Analyzes existing vibration isolation systems with passive and active controlled quasi-zero stiffness. Analyzes the possibility of the application active vibration suppression scheme built using modern adaptive materials in such systems.*

**Keywords:** vibration isolation system, quasi-zero stiffness, active vibration suppression, adaptive materials

#### Вступ

Ударні впливи та інтенсивні низькочастотні коливання, що виникають в різних машинах і механізмах становлять небезпеку для обслуговуючого персоналу, а також є причиною порушення роботи самих механізмів. Крім того, негативний динамічний вплив є причиною появи джерел шуму. Як правило, такі процеси носять випадковий характер і ефективний захист від них є досить актуальним, але до кінця залишається не вирішеною проблемою.

Для зниження віброактивності механічних систем, зменшення рівня шумів і вібрацій широко застосовують віброзахисні системи.

Практика показує, що традиційні засоби віброзахисту – гумові або гумометалеві амортизатори – часто не забезпечують необхідних параметрів зниження вібрацій і ударів. Гума помітно змінює свої демпфуючі властивості при зміні температури, схильна до швидкого старіння під впливом радіації, розчиняється в хімічно агресивних середовищах.

Відомі віброзахисні системи з пружними елементами, що мають два стійкі положення рівноваги, дуже ефективні при гасінні усього спектру вібрацій. Причому, якщо в системі

виникають коливання з певною, заздалегідь встановленою амплітудою, то пружний елемент з двома стійкими положеннями рівноваги мимоволі втрачає стійкість і об'єкт, що захищається, переходить на інший нелінійний режим. При цьому об'єкт, що амортизується, увесь час знаходиться в перехідному коливальному процесі, амплітуда якого обмежена.

Однак, ефективність таких віброзахисних систем прямо пов'язана з питаннями їхнього налаштування. Мала жорсткість пружного елемента потребує достатньо точного налаштування на розрахункове навантаження, інакше можливе розладнання системи і зниження ефективності роботи.

Отже, виникає проблема розробки віброзахисних систем з квазінульовою жорсткістю, які допускають їх перебудову на різні навантаження.

В зв'язку з цим перспективним бачиться використання напівактивних схем, виконаних на базі адаптивних матеріалів. Таким системам властиві адаптивні властивості активних схем управління вібраціями (активна зміна параметрів конструкції) і стабільність, що характеризує пасивні системи. Важливою перевагою таких систем являється достатньо мала енергозалежність (енергія потрібна тільки для функціонування приладу, який управляє, та невеликих електричних пристроїв, які модифікують механічні характеристики).

### Віброзахисні пружні системи з квазінульовою жорсткістю

Ідея використання пружних систем з квазінульовою жорсткістю на основі «ферми Мізеса» для віброзахисту динамічних об'єктів вперше була висловлена професором Алабужевим П. М. у 1967 р. Принципова схема такої коливальної системи представлена на рис 1.

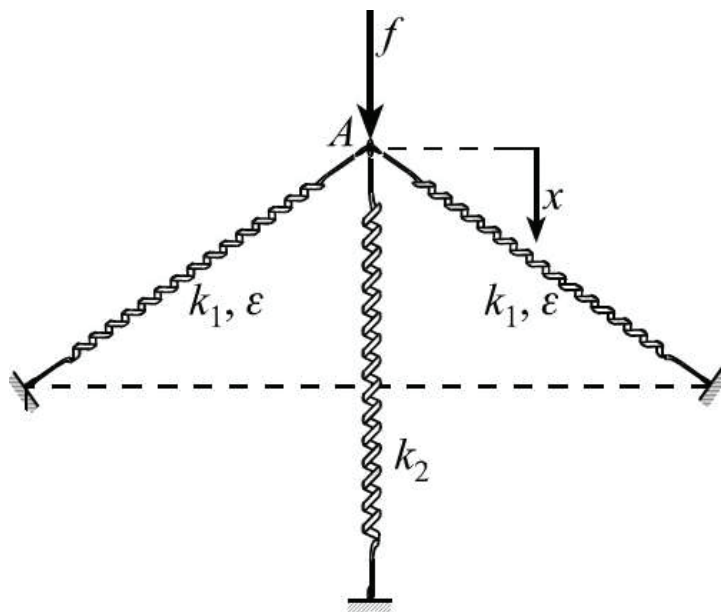


Рис. 1. Схема віброзахисної системи з квазінульовою жорсткістю

Залежність реактивної сили від переміщення для таких систем нагадує синусоїду. Завдання полягає в тому, щоб підібрати таку третю вертикальну пружину жорсткістю  $k_2$ , щоб кут нахилу прямої  $k_2 \cdot x$  збігався з кутом нахилу лінійної частини синусоїди. Тоді, при додаванні зусиль з'явиться ділянка з квазінульовою жорсткістю (рис. 2). Якщо підібрати відповідну масу, то в статичному положенні ця маса, яку захищаємо від вібрації, буде утримуватися пружиною з квазінульовою жорсткістю.

На теперішній час розроблена досить значна кількість різноманітних віброзахисних системи з квазінульовою жорсткістю. З прикладами таких систем маємо можливість ознайомитись в наступних роботах [1, 2]. Деякі автори займаються оптимізацією параметрів існуючих систем [3].

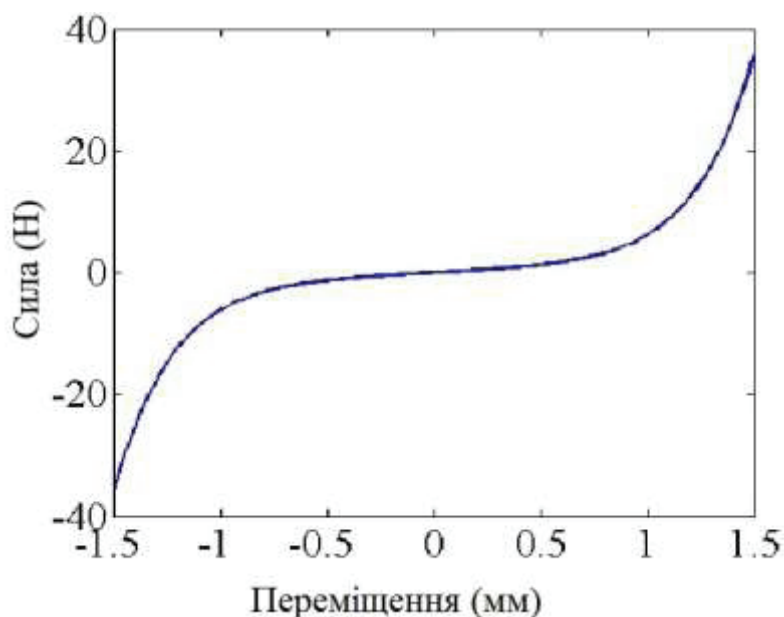


Рис. 2. Типова залежність для систем з квазінульовою жорсткістю

У наступній роботі автором доведено можливість розробки віброзахисних систем з квазінульовою жорсткістю з діапазонами переміщень, на яких жорсткість дорівнює нулю, в кілька разів перевищуючих робочі діапазони існуючих систем з квазінульовою жорсткістю [4].

Ударозахисна пружна система з ділянками квазінульової жорсткості, яка дозволяє передавати силу удару на основу конструкції, за рахунок поглиначів енергії удару пропонується у роботі [5].

Системи з квазінульовою жорсткістю знаходять застосування на практиці. Вони використовуються в віброзахисних кріслах, захисту рухомих складів від вібрації на залізниці та в деяких інших областях прикладної техніки.

Багаторічний досвід авторів з дослідження віброзахисних систем з квазінульовою жорсткістю показує, що дані системи мають великий потенціал в віброізоляції, проте досягнення даного ефекту на надійному практичному рівні викликає проблеми. Такі системи потребують достатньо точного налаштування на розрахункове навантаження, яке може бути забезпечено за рахунок їх керованості.

#### **Віброзахисні системи з керованою квазінульовою жорсткістю**

Пасивно керована система віброзахисту вивчається у наступній роботі [6]. Розроблена модель системи складається з трьох основних частин, які механічно пов'язані між собою: несучої системи, коректора жорсткості і системи регулювання. Несуча система забезпечує необхідну несучу здатність. Коректор жорсткості за рахунок паралельного підключення до несучої системи пружних елементів, що мають негативну жорсткість, забезпечує реалізацію пружної характеристики з ділянкою квазінульової жорсткості на робочому режимі роботи системи. Автоматична підтримка ділянки квазінульової жорсткості пружної характеристики в положенні, яке відповідає робочому режиму, здійснюється пасивним регулятором.

Питання налаштування такої системи розглядаються у роботі [7]. Її математична модель розроблена у роботі [8].

Недоліком представленої пасивної віброзахисної системи є обмеженість сприйняття (фільтрації) полоси низьких частот зовнішнього навантаження, в якій відбувається функціонування пружного елемента квазінульової жорсткості [9].

Удосконалена модель керованої віброзахисної системи з квазінульовою жорсткістю пропонується у наступному авторському свідоцтві [9]. Задача розширення функціональних можливостей системи вирішується за рахунок розміщення на опорі несучої конструкції

якоря електромагніта для відслідковування зміни низькочастотної складової зовнішнього навантаження. Позитивний ефект розробленої моделі пов'язаний з тим, що електромагніт, який вбудований в систему автоматичного керування жорсткістю пружної віброзахисної системи, коригує деформацію пружного елемента і тим самим збільшує полосу низьких частот зміни зовнішнього навантаження до потрібної величини.

Недоліком запропонованої віброзахисної системи є відсутність автоматизації керування процесом збільшення полоси низьких частот [10].

Вищезазначений недолік вирішується у роботі [10] де розроблено модель віброзахисної системи з автоматичним керуванням.

Суть розробленої моделі пояснюється кресленням принципової схеми реалізації запропонованого пристрою (рис. 3), і запропонованим варіантом конструкції активної віброзахисної системи з автоматичним керуванням за низькочастотним збудженням опор підшипників швидкісних роторних систем (рис. 4).

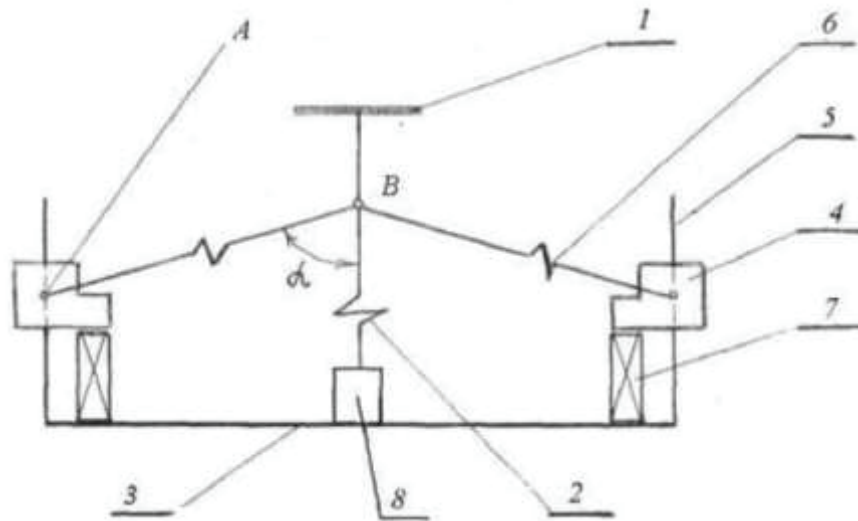


Рис. 3. Схема віброзахисної системи з активно керованою квазінульовою жорсткістю [10]

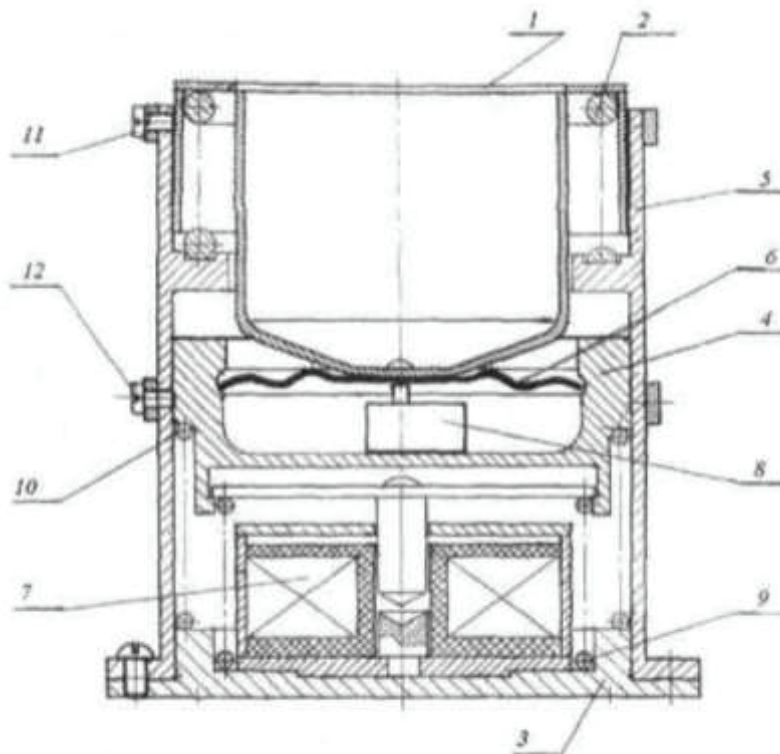


Рис. 4. Схема конструкції віброзахисної системи [10]



На представлених схемах містяться: несуча платформа 1 з центральним пружним елементом 2 (у вигляді кільцевої пружини стиску) на опорі 3, регулятор у вигляді щонайменше двох симетрично розташованих інерційних повзунів 4 на напрямних 5 з нахиленим пружним елементом 6 (у вигляді конічної гофрованої оболонки), якір електромагніта 7, мікроперемикач з реле часу із затримкою 8, допоміжні пружини 9 і 10, установочні гвинти 11 і 12.

Запропонована конструкція активної віброзахисної системи з керуванням за низькочастотним збудженням квазінульової опори функціонує наступним чином.

При збільшенні навантаження інерційні повзуни 4 зміщуються по напрямних 5, а центральний пружний елемент 2 на платформі 1 разом з пружним елементом 6 і допоміжними пружними елементами 9, 10 на опорі 3 отримують деформації. Керування діапазоном частот навантаження, що сприймається активною віброзахисною системою, здійснюється якіром 7 електромагніта, який коригує деформацію пружного елемента 6, а мікроперемикач з реле часу 8 утримує необхідну деформацію пружного елемента 6 протягом потрібного терміну його вмикання. Установочні гвинти 11 і 12 використовують для настройки системи та під час транспортування.

Позитивний ефект запропонованої віброзахисної системи пов'язаний з тим, що мікроперемикач з реле часу відслідковує режим зовнішнього навантаження і шляхом вмикання роботи електромагніта продовжує дію квазінульової жорсткості опори. Таким чином, запропонована активна віброзахисна система з автоматичним керуванням не тільки ефективно, але і надійно впродовж потрібного терміну вирішує задачу віброзахисту.

У зв'язку з вищезазначеним виникає необхідність побудови математичної моделі схеми активного керування для запропонованої віброзахисної системи. Найбільш ефективним бачиться використання узагальненої схеми методу контролю зі зворотнім зв'язком. Сутність такого методу керування полягає в наступному: вихідний сигнал системи подається на контролер і в подальшому, після перетворення впливає на саму систему. Основним завданням при реалізації цього методу є підбір відповідного контролера, який би дозволив замкнутій системі залишатися стійкою і виконувати поставлене завдання активного керування [11, 12].

При цьому необхідно враховувати, що у системах активного керування доцільно застосовувати сучасні адаптивні елементи. Такі елементи здатні змінювати свої механічні властивості (в'язкість, твердість, форму) під впливами температурної зміни, електричного або магнітного полів. При аналізі таких елементів можна виділити матеріали, які безпосередньо конвертують зовні прикладений електричний або магнітний вплив в механічний, або, навпаки, перетворюють механічний вплив в електричний або магнітний шляхом прямого фізичного ефекту на мікроструктурному рівні. До такого класу матеріалів відносяться п'єзо і електрострикційну кераміку, п'єзоелектричні полімери та магнітострикційні сплави.

### Висновки

Використання віброзахисних систем з керованою квазінульовою жорсткістю бачиться актуальним і перспективним. Впровадження в такі системи сучасні схеми активного керування, побудовані на базі адаптивних елементів, відкриває широкі можливості для подальшого розвитку такого класу пристроїв.

### Список використаної літератури:

1. Hyeong-Joon Ahn A unified model for quasi-zero-stiffness passive vibration isolators with symmetric nonlinearity / Ahn Hyeong-Joon // 22nd international conference on design theory and methodology; special conference on mechanical vibration and noise, 2010. – P. 689–693.
2. Robertson W. Planar analysis of a quasi-zero stiffness mechanism using inclined linear springs / W. Robertson, B. Cazzolato, A. Zander // Conference : Acoustics, at Victor Harbour, 2013. – P. 1–6.
3. Kovacic I. A study of a nonlinear vibration isolator with a quasi-zero stiffness characteristic / I. Kovacic, M. J. Brennan, T. P. Waters // Journal of Sound and Vibration. – 315.3. – 2008. – P. 700–711.
4. Зотов А. Н. Виброизоляторы с квазиулево́й жёсткостью / А.Н. Зотов // Вибрация машин, снижение, защита: науч.-техн. и производ. сб. ст. III междунар. науч.-техн. конф., 2005. – Донецк, 2005. – С. 51–55.

5. Зотов А. Н. Ударозащитная система с квазиулево́й жесткостью / А. Н. Зотов, Д. Т. Ахияров, Р. Ф. Надыршин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2006. – № 2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://ogbus.ru/authors/Zotov/Zotov\\_4.pdf](http://ogbus.ru/authors/Zotov/Zotov_4.pdf)
6. Патент на винахід 62934 Україна. Пасивна віброзахисна система з керованою квазіулевою жорсткістю / В. С. Гапонов, П. М. Калінін. – 2004. – Бюл. № 1.
7. Гапонов В. С. Оценка настройки параметров опоры с управляемым изменением квазиулево́й жесткости на величину критической угловой скорости жесткого ротора / В. С. Гапонов, А. И. Наумов, Ю. А. Остапчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 12 (986). – С. 128–133.
8. Гапонов В. С. Математическая модель упругой опоры с управляемой квазиулево́й жесткостью для подшипников высокоскоростных роторных систем / В. С. Гапонов, А. И. Наумов, Ю. А. Остапчук // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2012. – № 8. – С. 131–136.
9. Патент на винахід 69042 Україна. Віброзахисна система з керованою квазіулевою жорсткістю / В. С. Гапонов, А. В. Гайдамака, О. І. Наумов. – 2012. – Бюл. № 8.
10. Патент на винахід 80416 Україна. Активна віброзахисна система з автоматичним керуванням опор підшипників / В. С. Гапонов, А. В. Гайдамака, О. І. Наумов. – 2013. – Бюл. № 10.
11. Flotow A. H. Wave-absorbing controllers for a flexible beam / A.H. Flotow, B. Schafer / Journal of guidance control and dynamics – 1986. – 9(6). – P. 673–680.
12. Bailargeon B. Active vibration suppression of sandwich beams using piezoelectric shear actuators: experiments and numerical simulations / B. Bailargeon, S. Senthil/ Journal of intelligent material systems and structures – 2005. – Vol. 16. – P. 517–530.

#### References:

1. Hyeong-Joon Ahn (2010), A unified model for quasi-zero-stiffness passive vibration isolators with symmetric nonlinearity, *22nd international conference on design theory and methodology; special conference on mechanical vibration and noise*, P. 689–693.
2. Robertson W., Cazzolato B., Zander A. (2013) Planar analysis of a quasi-zero stiffness mechanism using inclined linear springs, *Conference : Acoustics, at Victor Harbour*, P. 1-6.
3. Kovacic I., Brennan M. J., Waters T. P. (2008) A study of a nonlinear vibration isolator with a quasi-zero stiffness characteristic, *Journal of Sound and Vibration*, 315.3, P. 700–711.
4. Zotov A. N. (2005), Vibration isolators with quasi-zero stiffness [Vibroizolyatoryi s kvazinulevoy zhyostkostyu], *Vibration machines, reduction, protection: scientific and engineering conf.*, Donetsk, P. 51–55.
5. Zotov A. N., Ahiyarov D. T., Nadyrshin R. F. (2006), Shock-proof system with quasi-zero stiffness [Udarozaschitnaya sistema s kvazinulevoy zhestkostyu], *Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"*, № 2. Available at: [http://ogbus.ru/authors/Zotov/Zotov\\_4.pdf](http://ogbus.ru/authors/Zotov/Zotov_4.pdf)
6. Gaponov V. S., Kalinin P. M. (2004), Passive vibro-protection system with controllable quasi-zero stiffness [Pasivna vbrozahisna sistema z kervanoyu kvazinulevoyu zhorstkistyu], *Patent na vinahid 62934 Ukraine*, Byul. № 1.
7. Gaponov V. S., Naumov A. I., Ostapchuk Y. A. (2013), Evaluation settings with support to manage change quasi-zero stiffness on the critical angular velocity of the rigid rotor [Otsenka nastroyki parametrov oporyi s upravlyaemyim izmeneniem kvazinulevoy zhestkosti na velichinu kriticheskoy uglovy skorosti zhestkogo rotora], *Bulletin of NTU "KhPI". Series : Energy and thermal processes and equipment*, № 12 (986), P. 128–133.
8. Gaponov V. S., Naumov A. I., Ostapchuk Y. A. (2012), A mathematical model of an elastic support with controlled quasi-zero stiffness for high-speed rotary bearing systems [Matematicheskaya model uprugoy oporyi s upravlyaemoy kvazinulevoy zhestkostyu dlya podshipnikov vyysokoskorostnyih rotornyih system], *Bulletin of NTU "KhPI". Series : Energy and thermal processes and equipment*, № 8, P. 131–136.
9. Gaponov V. S., Gaydamaka A. V., Naumov A. I. (2012), Vibro-protection system with controllable quasi-zero stiffness [Vbrozahisna sistema z kervanoyu kvazinulevoyu zhorstkistyu], *Patent na vinahid 69042 Ukraine*, Byul. № 8.
10. Gaponov V. S., Gaydamaka A. V., Naumov A. I. (2013), Active vibro-protection system with automatic control towers bearing [Aktivna vbrozahisna sistema z avtomatichnim keruvannyam opor pidshipnikiv], *Patent na vinahid 80416 Ukraine*, Byul. № 10.
11. Flotow A. H., Schafer B. (1986), Wave-absorbing controllers for a flexible beam, *Journal of guidance control and dynamics*, 9 (6), P. 673–680.
12. Bailargeon B., Senthil S. (2005), Active vibration suppression of sandwich beams using piezoelectric shear actuators: experiments and numerical simulations, *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol.16, P. 517–530.

Поступила в редакцию 17.12 2014 г.